

**Folyamatosan öntött lemezbugák
középvonali dúsulása és
következményei**

MTA doktori értekezés tézisei

dr. habil. Réger Mihály

Budapest, 2010

I. Bevezetés, célkitűzés

A lemezbugák folyamatos öntésének célja megfelelő összetételű, méretű, alakú és felületű, külső és belső hibáktól mentes termék előállítása. Az acél lemezbugák egyik sajátos, nehezen befolyásolható és ellenőrizhető hibajelensége az ún. középvonali dúsulás (középvonali szegregáció, centerline segregation), mely a lemezbuga további feldolgozását és a belőle készülő termék felhasználhatóságát rontja. A középvonali dúsulásos lemezbugából hengerelt lemez – az erőteljes képlékeny alakítás ellenére is – módosult formában magában hordozza ezt a hibajelenséget. Az öröklődés eredményeként a lemez középső síkjában – a megelőző alakváltozás függvényében – néhány tized, illetve néhány mm vastagságban az alapanyagtól eltérő összetételű, szerkezetű és tulajdonságú anyagrésszal találhatók, mely a forgácsolási, hegesztési és alakváltozási műveleteknél technológiai problémákat (pl. felnyílás, repedés, a megmunkáló szerszám károsodása) okozhat. A tapasztalatok szerint a középvonali dúsulásból adódó kedvezőtlen anyagtulajdonságok utólagosan, pl. hőkezeléssel érdemben nem javíthatók.

Az elmondottakból következik, hogy a középvonali dúsulás mértékének befolyásolására csak az acéolvadék kristályosodása közben van lehetőség, vagyis a folyamatos öntés berendezéseinek, illetve az azon alkalmazott technológiának kell biztosítani a hengerelt termékben a felhasználók számára elfogadható középvonali dúsulási szintet.

A doktori értekezésemben a középvonali dúsulás kialakulásának elméleti megközelítésével, illetve annak csökkentési lehetőségeivel kapcsolatos kutatási tevékenységet ismertetem. Az elmúlt tíz évben végzett kutatási munkám – közvetve, vagy közvetlenül – kapcsolatban áll a középvonali dúsulás kialakulásával, és az egyes részterületeken elért eredmények önmagukban is értelmezhetők.

A kutatómunkám alapvető célja a folyamatos acélöntés reális, üzemi gyakorlati viszonyai között a lemezbugában kialakuló középvnali dúsulás csökkentési lehetőségeinek feltárása, valamint ennek ismeretében a várható dúsulási mérték számszerűsíthető előrejelzése. A problémakör reális viszonyok közötti megközelítéséhez szükséges az öntés folyamatát befolyásoló, ipari körülmények között működő hatások széleskörű ismerete és figyelembe vétele. Ezek közül kiemelem az öntött szál szilárduló kérgét érő deformációs hatást, melynek eredményeként a szál belsejében térfogatváltozás jön létre és így az ott lévő olvadék áramlásra kényszerül. A kutatási tevékenység egyik alapvető célkitűzése ezen deformációs hatások sokoldalú figyelembevétele volt, mivel a tapasztalatok szerint a gyakorlati öntés feltételrendszerében ez a tényező befolyásolja a legnagyobb mértékben és a legkevésbé kiszámítható módon az öntött lemezbugák belső minőségét. A teljes problémakör komplexitása miatt a feladat megoldásához többféle matematikai modell alkalmazása illetve kifejlesztése volt szükséges.

II. A kutatási tevékenység összefoglalása

II.1. A folyamatos öntés matematikai modellezése, számítógépes szimulációja

Az acélok folyamatos öntése világszerte széles körben alkalmazott tömeggyártási technológia. Ennek ellenére a komplex folyamat matematikai modellezésének, számítógépes szimulációjának eredményei alapján a termékminőség előrejelzése a jelenlegi ismereteink szerint közelítésekkel is csak nehezen valósítható meg. Ennek döntően az az oka, hogy az öntési folyamatban hőtani, áramlástani, dermedési, átalakulási, rugalmas és képlékeny alakváltozási, kúszási, stb. jelenségek kapcsolódnak össze és hatnak egymásra [II.1.1-II.1.3]. A nehézségeket fokozza az a körülmény, hogy a folyamatosan öntött lemezbuga alakja, a vastagság, szélesség és hosszúság viszonyszámai a számítógépes szimuláció szempontjából nem kedvezőek. Hagyományos méretű lemezbugák esetén az öntött szál öntési irányban vertikális gépeknél mintegy 10

méter, ívelt öntőgépeknél 25-30 méter hosszúságú, vastagsága 200-240 mm, szélessége pedig általában 800-1600 mm közötti. További nehézséget jelent a szimuláció által szolgáltatott eredmények ellenőrzése, mivel a kristályosodás egy kívülről nehezen vizsgálható rendszerben, a lemezbuga belsejében történik.

Ismereteink szerint az öntéstechnológiai paraméterek, a technikai, gépészeti adottságok és a várható belső minőség közötti kapcsolatot megbízható módon előre jelző függvény, vagy matematikai módszer kidolgozása ezidáig egyetlen kutatóhelyen, illetve gyártóműben sem sikerült, még az öntés állandósult állapotára vonatkozóan sem. Részben ez a körülmény motiválta a kutatási feladatok megfogalmazását.

A kutatási munkámban figyelembe vettem minden olyan lényeges hatást, mely állandósult és nem állandósult öntési viszonyok között befolyásolhatja az öntött termék minőségét, ezeket megpróbáltam szétválasztani és az egyedi hatástényezőket azonosítani. Több esetben – a megfelelő matematikai formalizmus, vagy megbízható numerikus számítási eljárások hiányában – empirikus módszerek alkalmazására kényszerültem, elsősorban az egymással kölcsönhatásban álló folyamatok elemzésekor. Például az öntött szál dermedése és lehülése kielégítő pontossággal leírható a jelenleg ismert és alkalmazott módszerekkel, de abban az esetben, ha sor kerül az öntött szál deformációjára, alakváltozására, esetleg kúszására, akkor többnyire empirikus összefüggések bevezetése is szükséges.

A problémakör vizsgálata esetenként olyan területet érint, mely elméleti szempontból sem tisztázott teljesen. A lemezbugák belső minősége szempontjából meghatározó jelentőségű pl. a likvidusz és szolidusz hőmérsékletközben (szilárd és olvadék fázist is tartalmazó mushy zóna) az acélolvadék viselkedése, tulajdonságai. Az ismeretek ezen a területen meglehetősen hiányosak, a mérési eredmények pedig sokszor ellentmondások, ahogy ezt R.G. Erdmann (University of Arizona, Department of Materials Science and Engineering) is

összefoglalta a „Permeability in the Mushy Zone” című átfogó előadásában a legutóbbi „Solidification and Gravity” konferencián [II.1.4]. Ez a példa egyúttal rávilágít az alkalmazott kutatás és az alapkutatás szoros kapcsolatára is.

II.2. A középvonali dúsulás jellegzetességei

A szakirodalom és a méréseink, tapasztalataink alapján a lemezbugák középvonali dúsulása részben a makrodúsulással, részben a megszilárduló olvadék zsugorodásával, apró fogyási üregek képződésével kapcsolatos jelenség (ez utóbbit az acélok folyamatos öntésével foglalkozó szakirodalom porozitásnak nevezi). A középvonali dúsulás a folyamatos öntés során az öntött szál középvonali tartományában alakul ki, a kristályosodási és átalakulási (mikrodúsulás), olvadékáramlási folyamatok, valamint a kristályosodási zsugorodás kompenzálásához szükséges olvadék utánpótlás korlátozott lehetőségeinek függvényében.

H. Jacobi részletesen tárgyalja a makrodúsulás és a porozitás vizsgálati lehetőségeit a lemezbugák belsejében [II.2.1]. Megállapítja, hogy a porozitás a lemezbuga szélessége és hosszúsága mentén egyaránt változik. Ez azt jelenti, hogy a lemezbuga hosszirányában két egymást követő keresztmetszeti síkban nem feltétlenül – sőt a később ismertetett tényezők alapján állítható, hogy bizonyosan nem – tekinthető azonos mértékűnek a porozitás (a pórusok mérete, mennyisége, eloszlása).

G. Lesoult áttekintő cikket közölt a makrodúsulás témaköréről [II.2.2]. Japán kísérleti adatokra támaszkodva elemzi az olvadékmag redukció és a karbon középvonali dúsulási indexe közötti függvényt, mely minimumos jellegű. Ennek alapján az olvadékmag redukció mértéke optimalizálható, értéke mintegy 0,9 mm/m. Megerősíti, hogy a dúsulási index erőteljes, közel 60 %-os ingadozást mutat öntési irányban a vizsgálat helyének függvényében. A makrodúsulás kialakulásával kapcsolatosan megállapítja, hogy meghatározásának

egyrészt a kristályosodási folyamatok, másrészt a mushy zónában, mushy szakaszon kialakuló tömegáramlás ismerete a feltétele. Cikkének utolsó szakaszában megjegyzi, hogy a lemezbugák középvonali dúsulásának kézbentartásához mindenképpen szükség van a mushy zóna szilárduláshoz közeli állapotának realisabb ismerete.

A középvonali szegregáció szempontjából azok a folyamatok meghatározóak, melyek a kristályosodó szál hosszának kb. utolsó harmadában történnek, ekkor a középvonalban a hőmérséklet a likvidusz hőmérséklet alatt van, vagyis a szál közepe a mushy (mushy szilárd + mushy olvadék) állapottal jellemezhető (az értekezésben ezt a kifejezést használom, mivel megfelelő magyar nyelvű szakkifejezés ezidáig nem honosodott meg a mushy állapotra). A szál ezen részét a következőkben – a tárgyalás egyszerűsítése végett – mushy szakasznak nevezem. A dendritek között már csak dúsult olvadék található, így bármely hatás (hűtési viszonyok, támgörgők beállításai, a szilárd kéreg támgörgők közötti kihasasodása, az ún. kihajlás, stb.), mely olvadékmozgást eredményez, szükségképpen az öntött szál belsejében olvadékáramláshoz és így makrodúsuláshoz vezet. (A szilárd kéreg ferrosztatikus nyomás okozta kihasasodásának jelensége, nem teljesen szerencsésen kihajlás néven honosult meg a magyar szaknyelvben. A továbbiakban kihajláson ezt a deformációt értem.) Lényeges, hogy a mushy zónában az olvadék keveredési és utánpótlási lehetősége drasztikusan csökken a szilárd fázis térfogatarányának növekedésével. A dendritágak közötti zeg-zúgos rendszer áteresztő képessége (permeabilitása) lecsökken, így ebben a tartományban már csak korlátozott olvadék utánpótlás és keveredés lehetséges. Az olvadék utánpótlás lehetőségének csökkenése törvényszerűen fogyási üregek, ún. mikrolunkerek keletkezését eredményezi, ez a középvonali dúsulás általánosságban megfigyelhető másik jellegzetessége.

A középvonali dúsulással kapcsolatos egyik nehézség mindjárt magának a fogalomnak a definíciójából, illetve a konkrét

középvonali dúsulási érték meghatározásának bizonytalanságából fakad. A szakirodalom ezt az elnevezést gyakorta használja, és a különböző kémiai elemek – egymástól eltérő – dúsulási mértékével (dúsulási hányados = koncentráció a középvonalban / átlagos koncentráció) jellemzi. Középvonali dúsulási értéket tehát meg lehet adni a karbonra, mangánra, kénre stb., de ezek számértékben nyilvánvalóan különbözőek.

A kérdéskörrel Y. Tsuchida és munkatársai foglalkoztak részletesen szintén az olvadékmag redukció bevezetése kapcsán [II.2.3]. A vizsgálat célja az volt, hogy a keresztmetszeten makromaratással megállapítható középvonali dúsulást, annak területét mikroelemzési adatokkal jellemezzék. Ez utóbbi eredményekből megállapították, hogy a mangán és a foszfor dúsulása között hatványfüggvény jellegű összefüggés van. A maratott mintákon meghatározott, dúsult területarány és a foszfor dúsulási indexe között – igaz nagy szórással – de szintén hatványfüggvény jellegű kapcsolat volt azonosítható. H. Presslinger [II.2.4]. összefüggést keresett a makrodúsulás mértéke és a porozitás között. Az optikai emissziós vizsgálatok alapján a maximális és az átlagos ötvöző és szennyező tartalom (Mn, C, S, P) hányadosaként definiált makrodúsulás és a porozitás között gyenge lineáris kapcsolat adódott. Ez utóbbi megállapítás arra utal, hogy a középvonali szegregáció makrodúsulási és porozitás képződési folyamatai csak részben függenek össze. Megjegyzem, hogy a saját vizsgálatait tapasztalataink is ugyanezt valószínűsítik.

A szakcikkekben ismertetett vizsgálati módszer meglehetősen költségigényes, mivel sok kisméretű próba kimunkálását és részletes vizsgálatát igényli, így az ipari gyakorlatban nem terjedt el. Az acélgyártók általában olcsóbb, gyorsabb és automatizálható eljárást alkalmaznak, ezek a módszerek viszont kevésbé számszerűsíthető információkat szolgáltatnak a középvonali dúsulásról. Általában a lemezbugákból adott mennyiségként kívágnak egy szeletet, megköszörülik, majd speciális módszerrel maratják (pl. mélymaratás, sósavas maratás nagyobb hőmérsékleten). Ezt követően, vagy a megmaródott anyagrész adott felületnagyságra eső aránya

(képelemzési módszer alkalmazása), vagy saját etalonképekkel való összehasonlítás alapján a keresztmetszeten megállapítják a középvonali dúsulás mértékét (pl. Mannesmann cégcsoport etalonkép sorozata). A Baumann kénnyomat szerint történő minősítésre is lehet példát találni. Ezekkel a módszerekkel a középvonali dúsulás megléte, illetve hiánya általában könnyen eldönthető, a mérték megítélése viszont meglehetősen szubjektív. A középvonali dúsulás meghatározására vonatkozó nemzetközileg elfogadott egységes eljárás tehát nem alakult ki, az üzemek a saját gyakorlatuk és tapasztalataik szerint minősítik a termékeiket, illetve döntenek annak felhasználhatóságáról.

II.3. A matematikai modellek és a szimuláció alapelvei, jellegzetességei

A folyamatok kézbentartásának (így pl. a középvonali dúsulás csökkentését célzó stratégia kialakításának, vagy az olvadásmag redukációs technológia bevezetésének) alapvető feltétele az öntött szál megbízható hőtani modelljének kidolgozása. Az értekezésben röviden összegzem az ezen a területen végzett több éves tevékenység főbb lépéseit. Ennek eredményeként elkészült az ISD Dunaferr Dunai Vasmű Zrt. folyamatos öntőgépjének hőtani működését leíró, üzemi kísérletekkel is ellenőrzött modellje. A tisztán hőtani alapokon nyugvó modellel az öntés számos alapvető jellemzője kielégítő pontossággal meghatározható (pl. tócsamélységek, gradiensek, hűlési sebességek) [II.3.1-II.3.5] és ezek alapján, pl. a mikroszerkezetre vonatkozóan további következtetések is levonhatók (primer dendritág távolság, szekunder dendritág távolság, oszlopos-egyenlőtengelyű kristályosodás átmenete).

A középvonali dúsulás kialakulásában a kristályosodást kísérő zsugorodási mikroüregek szerepét már hangsúlyoztam. A belső minőség szempontjából döntő fontosságú, hogy milyen feltételek között és mekkora zsugorodási üreg halmaz keletkezik a lemezbuga dermedése során. Az értekezésben részletesen tárgyalom ezt a

kérdéskört egy kiterjedt statisztikai elemzéssorozat eredményeire támaszkodva. Kifejlesztettem az un. olvadékmozgás intenzitási modellt (LMI, Liquid Motion Intensity Model), mely a lemezbuga dermedését kísérő természetes és kényszer alakváltozások, valamint a térfogatváltozások hatását is figyelembe veszi. A modell alkalmazásával relatíve erős korrelációs kapcsolatot állapítottam meg a zsugorodási üregek összmenyiségét jellemző számérték és az üzemi mérések során meghatározott középvonali dúsulási index között. A matematikai modell segítségével kimutattam, hogy a folyamatos öntés körülményei között a szabad olvadékáramlás (vagyis a kristályosodási zsugorodás kompenzálásához szükséges olvadék utánpótlásának lehetősége) a mushy zóna mintegy 30 %-os olvadéktartalmáig biztosított, e határérték alatt porozitás kialakulása valószínűsíthető. Ezen érték és a további zsugorodási és deformációs hatások alapján már becsülni lehet a kompenzálatlan zsugorodási üregek mennyiségét.

Erre alapozva további következtetéseket is megfogalmaztam. Mivel a szabad olvadék utánpótlás a fent említett határérték elérésekor megszűnik, így az értekezésben bemutatott – természetesen számos egyszerűsítést és feltételezést is tartalmazó – modell segítségével a mushy zóna első szakaszában kialakuló olvadékáramlás irányának és nagyságának a becslésére is lehetőség kínálkozik. Ha a mushy tartomány ebben a szakaszban olvadékot szív be a felette lévő zónából, akkor a beáramló olvadék ötvözőkben és szennyezőkben bizonyosan dúsabb lesz, mint amilyen összetételű olvadék a kristályosodás (közel egyensúlyi koncentráció viszonyok közötti) folytatásához szükséges lenne. Ennek természetesen az ellenkezője is előfordulhat, a szálát vezető támgörgők ki is préselhetik a magrészen lévő olvadékot. A modell az olvadék szabad áramlásával jellemezhető mushy zóna hosszára vonatkozóan becslést ad az olvadék áramlás iránya és nagysága tekintetében.

Az értekezés a bemutatott modellek gyakorlati alkalmazásának lehetőségeit is elemzi állandósult (az öntési paraméterek az idő függvényében nem változnak) és nem állandósult (az öntési

paraméterek az idő függvényében változnak) öntési viszonyokra vonatkozóan. A számítási tapasztalatok szerint a középvonali dúsulás jellemzőit (adott összetétel és hűtési technológia esetén) alapvetően a támgörgők beállítása, a szálvezetés precizitása (pl. támgörgő beállítási pontossága, támgörgő merevsége) és a támgörgők alakhibája (pl. excentricitás, kopás) befolyásolja. Az öntött szálnak a támgörgők közötti kihasadása (bulging) szintén szerepet játszhat, de – az előző tényezőkhez képest – ennek hatása a vizsgálatok szerint másodlagos.

II.4. A középvonali dúsulás stabilitása

Az értekezés befejező része a lemezbugában már kialakult középvonali dúsulás következményeivel foglalkozik. A középvonali dúsulás termékminőséget befolyásoló hatása – és egyben a hengerelt termék belsejében való azonosíthatósága – a hengerelt lemez vastagságának is függvénye. Általánosságban kijelenthető, hogy minél vékonyabb a durvalemez (szalag), annál kevésbé rontja a minőséget a középvonali hibajelenség. A tapasztalatok szerint az utólagos hőkezelés, homogenizálás nem csökkenti érdemben a hengerelt termék középvonali dúsulását, és ez látszólag ellenmondásban van az egyszerű diffúziós modellek által szolgáltatott eredményekkel [II.4.1]. Az értekezés erre a jelenségre, vagyis a középvonali dúsulás stabilitására vonatkozóan újfajta megközelítésből ad magyarázatot. A kísérleti munka során mesterséges középvonali dúsulásos „szendvics” mintákat állítottunk elő, ezek hőkezelése és vizsgálata lehetőséget nyújtott a diffúziós folyamatokban az egyes elemek (pl. karbon és mangán) kölcsönhatásának – különböző modellek [II.4.2-II.4.4] alkalmazásával történő – figyelembe vételére is. Ennek alapján újfajta, a karbon aktivitásának elemzésén alapuló számítási modellt dolgoztam ki. A keménységi és szövetszerkezeti eredmények jó összhangban vannak a modell által szolgáltatott értékekkel.

III. A kutatási tevékenység eredménye

III.1. A kutatási munka eredményeként megfogalmazható új tudományos eredmények, tézisek

A folyamatosan öntött acél lemezbugák kristályosodásával és annak középvonali dúsulásával kapcsolatos elméleti és gyakorlati kutató munkám során a következő, új tudományos eredményekre jutottam:

1. Módszert dolgoztam ki az öntött szálnak az öntőgépben kialakuló vastagsági méretének meghatározására. Az eddig alkalmazott megközelítésekkel szemben az új modell az ipari körülmények között az öntött szátra ható külső deformációs kényszerekből (nevezetesen a támgörgő résméret csökkentésből, támgörgők pozicionálási hibájából, kopásából, excentricitásából, valamint a támgörgők közötti kihajlásból) adódó vastagsági méretváltozást is figyelembe veszi. Az ipari körülmények között öntött lemezbugának a meniszkusz szinttől számított $h(i)$ távolságban érvényes vastagsági értékének számítása céljából bevezettem a

$$r^i = r_{névl}^i + \Delta r_{poz}^i + \Delta r_{exc}^i + \Delta r_{bulg}^i \quad (1.1)$$

összefüggést, ahol

- $r_{névl}^i = f_{névl}(h(i))$ a névleges támgörgő fél résméret a meniszkusz szinttől számított $h(i)$ távolságban, a
- $\Delta r_{poz}^i = f_{poz}(h(i))$ a beállítási hibák és kopás miatt,
- $\Delta r_{exc}^i = f_{exc}(h(i))$ az excentricitás és csapágyhibák okozta,
- $\Delta r_{bulg}^i = f_{bulg}(h(i))$ pedig a kihajlásból adódó fél résméret eltérést reprezentálja a meniszkusz szinttől mért $h(i)$ távolságban.

Az (1.1) szerint definiált r^i függvény megadja az öntőgépben lévő lemezbuga minden vizsgált metszetében a külső deformációs kényszereket is magában foglaló realiztikus fél vastagsági méretet. [T1, T2, T10, T11, T15, T17]

2. Számítási eljárást dolgoztam ki a folyamatosan öntött lemezbuga kristályosodásából és lehüléséből adódó (külső deformációs kényszerek nélküli) kéregvastagsági jellemzőinek meghatározására.

A szál kényszer alakváltozás nélküli $d_{tot,term}^i$ fél vastagságát a meniszkusz szinttől egy adott távolságban a

$$d_{tot,term}^i = d_{sol,term}^i + d_{mush,sol,term}^i + d_{mush,liq,term}^i + d_{liq,term}^i \quad (2.1)$$

összefüggéssel számítottam, ahol

- $d_{sol,term}^i$ a teljesen szilárd kéreg,
- $d_{mush,sol,term}^i$ a mushy szilárd fázisának,
- $d_{mush,liq,term}^i$ a mushy olvadék fázisának,
- $d_{liq,term}^i$ pedig a tiszta olvadékfázisnak a fajtérfogat változással

korrigált vastagsági értéke. A (2.1) összefüggéssel definiált $d_{tot,term}^i$ megadja az öntött lemezbuga külső deformációs kényszerek nélküli, fajtérfogat változással korrigált fél vastagságát minden vizsgált metszetben. [T1, T2, T5, T10, T11, T15, T17]

3. Módszert dolgoztam ki a lemezbuga belsejében kialakuló olvadékmennyiségi viszonyok általános jellemzésére. A számítási eljárás azon a koncepción alapszik, hogy az öntési irányra merőleges irányban véges vastagságú szeletekre osztott lemezbugának a meniszkusz szinttől $h(i)$ távolságban lévő keresztmetszetében a várható Δd^i olvadékhány, illetve olvadék felesleg számszerű értékét az r^i (a reális fél vastagságot megadó, külső deformációs kényszereket figyelembe vevő függvény) és a $d_{tot,term}^i$ (külső alakváltozási kényszerek nélkül számított) függvény

$$\Delta d^i = r^i - d_{tot,term}^i \quad (3.1)$$

különbsége jellemzi. A Δd^i mennyiség felhasználásával definiáltam azt a síkban értelmezett és a

$$\Delta V^i = \Delta p_{kor}^i \cdot (h(i) - h(i-1))/2 \quad (3.2)$$

összefüggéssel számítható olvadékmennyiség változást, mely a lemezbuga egy vizsgált szeletében bekövetkezik, miközben a szelet az öntés során a meniszkusz szinttől számított $h(i-1)$ távolságból a $h(i)$ távolságig halad. A (3.2) összefüggésben

$$\Delta p_{kor}^i = C_3 \cdot \Delta p^i, \text{ ahol } C_3 \text{ konstans és}$$

$$\Delta p^i = \Delta d^{i-1} - \Delta d^i.$$

Bevezettem az *LMI* függvényeket és azokat a paramétereket, melyek a ΔV^i jellemző felhasználásával különböző tartományokban (szálszakaszokban) és feltételrendszerben kumulatív módon generálhatók. Az összegzés a szál egészére, bizonyos tartományaira, előjeltől függetlenül, vagy az azonos előjelűeket szeparáltan kezelve is elvégezhető. Eredményesen alkalmaztam az *LMI* függvényeket az öntött szál belsejében kialakuló olvadékmennyiségi viszonyok számszerű jellemzésére. [T1, T2, T5, T10, T11, T15, T17]

4. A folyamatosan öntött acél lemezbuga mushy szakaszának kristályosodásával kapcsolatosan az *LMI* matematikai modellel végzett olvadékmennyiség számítási, valamint az üzemi kísérletek statisztikai elemzési eredményei, illetve ezek összevetése alapján megállapítottam: az öntött szál mushy szakaszán belül azonosítható egy olyan mushy-olvadék / mushy-szilárd térfogatarány, melynek elérését követően a szál belsejében – a zsugorodás kompenzálásához szükséges – olvadék utánpótlás leállása detektálható. A folyamatos öntés vizsgált viszonyai között a szabad olvadékáramlás akkor áll le, ha a mushy olvadéktartalom 30% alá csökken. Ez a mushy olvadéktartalom általában az öntött szál mushy szakaszának mintegy felénél található. [T17, T19, T20, T24]

5. Megállapítottam, hogy a mushy szakasz első felében (meniszkusz irányába eső részben, ahol a mushy olvadéktartalom >30 %) az olvadék kényszeráramlása a domináns folyamat. A mushy szakasz második részén (vágó szint irányába eső részben, ahol a mushy olvadéktartalom <30 %) a kristályosodási zsugorodásból adódó

térfogatcsökkenés olvadékáramlással már nem tud kompenzálódni. Ebben a szakaszban a dendritek között a zsugorodási mikroüregek (porozitás) képződése a meghatározó folyamat. [T17, T18, T19, T20, T24, T25]

6. A matematikai modell alkalmazásával az öntött szál középvonali dúsulásában szerepet játszó mikroüregek kialakulási folyamatát és mennyiségét kvantitatív módon jellemeztem a „porozitási függvényvel”. A számításhoz az öntési irányra merőleges irányban véges vastagságú szeletekre osztott lemezbuga modellt alkalmaztam. A „porozitási függvény” a mushy szakasz második részén, azaz a meniszkusz szinttől számított $h(g)$ és $h(z)$ távolságok között értelmezett. A g és z értéke a következőképpen definiált: g a 30 % mushy olvadéktartalomhoz tartozó, a meniszkusz szinttől $h(g)$ távolságban lévő szelet sorszáma, z az első olyan szelet sorszáma, melyben a mushy olvadéktartalom zérus, vagyis $h(z)$ megegyezik a szoliduszra számított töcsamélységgel.

A „porozitási függvény” értéke a meniszkusz szinttől számított $h(n)$ távolságban (azaz az n -edik szeletben) az

$$LMI7(n) = \sum_{i=g}^n \Delta V^i \quad (\Delta V^i < 0) \quad (6.1)$$

paraméter értékével azonos, ahol ΔV^i az $i-1$ és i -edik szelet közötti, síkban értelmezett olvadékmennyiség-különbség, melyre teljesül a $g \leq n \leq z$ feltétel.

Az $LMI7(n)$ függvény a teljes értelmezési tartományra meghatározható, ha n tart z -hez. A „porozitási függvénynek” a teljes kristályosodási folyamat végére kialakuló végső értéke ($n = z$ eset) jellemzi a szál középvonali dúsult részén a dermedés utáni végső porozitást. Minél kisebb a „porozitási függvény” végső értéke, annál kisebb porozitás várható a folyamatosan öntött lemezbugában. [T17, T19, T20, T24, T25]

7. Gyakorlatban előforduló öntési esetek (technológiai és technikai változatok) szisztematikus számítógépes szimulációja alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a „porozitási függvénnyel” kvantitatív, az „olvadékáramlási függvénnyel” pedig kvalitatív (olvadékáramlás iránya, nagyságrendje) módon elemezhető az öntési paramétereknek (pl. öntési sebesség, túlhevítés, szekunder hűtési intenzitás, stb.) és az ipari körülmények között működő, külső kényszerből adódó deformációs jelenségeknek (résméret csökkenés, támgörgők beállítási hibája, kopása, excentricitása, a támgörgők közötti kihajlás) a középvonali dúsulásra gyakorolt befolyása. A kidolgozott számítási módszer alkalmas az öntési paraméterek és a résméret csökkentési stratégia optimalizálására a várható középvonali dúsulás szempontjából. [T17, T19, T20, T22, T25]

8. A komplex matematikai modellel végzett számítások eredményeire alapozva kimutattam, hogy a lemezbuga végső porozitása alapvetően a támgörgők résméretének célszerű csökkentési ütemével befolyásolható. A támgörgők közötti kihajlás a porozitás szempontjából másodlagos szerepet játszik. Ugyanakkor a lemezbuga mushy szakaszának felső részén kialakuló olvadékáramlás iránya és nagysága, így várhatóan a makrodúsulás mértéke is érzékenyen függ mind a támgörgő résméret csökkentési ütemtől, a pozícionálási hibától, a támgörgők excentricitástól, mind pedig a támgörgők közötti kihajlás mértékétől. [T17, T19, T20, T22, T25]

9. Szisztematikus számítási sorozat elvégzésével bizonyítottam, hogy az összes támgörgő beállítási hibája, excentricitása, kopása és a támgörgők közötti kihajlások szuperponálódott hatásának eredményeként a porozitás – és várhatóan a makrodúsulás mértéke is – az öntött szál hossza mentén még állandósult öntési viszonyok között is változik. A porozitás ingadozásának alsó és felső határát a gépészeti paraméterek (támgörgő beállítás és annak hibái) ismeretében becsültem. Egy szokásos méretű vertikális lemezbuga

öntőgép esetén a támgörgők $\pm 0,2$ mm-es excentricitása a középvonaltól várható porozitás értékében mintegy ± 25 %-os relatív ingadozást okoz. Az ingadozás véletlenszerűnek tekinthető, mivel az egyedi támgörgőkből adódó hatások aszinkron módon összegződnek. [T17, T19, T20, T22, T25]

10. A középvonali dúsulás utólagos hőkezeléssel (homogenizálással) történő csökkentési lehetőségeinek elemzésére matematikai modellt dolgoztam ki, melynek jellemzője, hogy a karbon diffúzióját az ötvöző elemeknek a karbon aktivitásra kifejtett hatását is figyelembe véve írja le. A modellel a szerkezeti acélokban kialakuló jellegzetes középvonali dúsulás (melyekben Mn és C dúsulási értéke általában 2-4-szeres) homogenizálási hőkezeléssel való megváltoztatásának lehetőségeit vizsgáltam. Megállapítottam, hogy a középvonali dúsulás homogenizálással történő utólagos csökkentését a mangántartalom nem egyenletes eloszlása gátolja. A mangántartalom kiegyenlítődése – a vonatkozó diffúziós tényező alacsony értéke miatt – sem a lemezbuga meleghengerlés előtti újrahevítése, sem a hengerlést követő homogenizálás során nincs számottevő lehetőség. Ha a mangántartalom nem egyenletes, akkor a karbontartalom sem egyenlítődik ki, így a dúsult és nem dúsult tartományok között mind a karbon-, mind a mangántartalom tekintetében – még több órással homogenizálás után is – számottevő koncentráció különbség detektálható. [T21, T23, T26-28]

11. Kísérleti és számítási eredmények alapján megállapítottam, hogy a mangánnak a karbon diffúzióra kifejtett fékező hatását Wyss cementálási kísérleteken nyugvó modellje alul-, a Hillert által kidolgozott, a Fe-Mn-C rendszerre felírt két alrács bevezetésén alapuló megközelítés pedig túlbecsüli. A fékező hatás a Hillert féle modell és annak Huang által továbbfejlesztett változatából becsülhető mérték közé esik. [T21, T23, T26-28]]

III.2. Az új tudományos eredmények hasznosítása

A kutatási eredmények hasznosítására közvetlenül az üzemi technológiatervezés és ellenőrzés területén került, illetve kerül sor jelenleg is. A folyamatosan öntött lemezbuga kristályosodási folyamataival kapcsolatos elméleti megfontolások, illetve számítási módszerek két különböző szimulációs szoftver formájában realizált komplex modellrendszerbe épültek be.

Az egyik szoftver a folyamatos öntés állandósult állapotának matematikai leírására szolgál. Jellegzetessége, hogy a lemezbuga hosszirányú alkotói mentén elvégzett két-dimenziós számítási módszer eredményeiből a lemezbuga kristályosodási sajátosságainak három-dimenziós leírását adja.

A másik szoftver a nem állandósult öntési viszonyok, eredményeként kialakuló jellemzők becslésére hivatott. A modell a lemezbuga széles oldalának középvonalára merőleges síkra vonatkozó eredményeket szolgáltatja az idő, illetve az időben változó öntési paraméterek függvényében.

Mindkét szoftver alkalmas a gyakorlati öntési viszonyok nevezetesen a támgörgő résméret csökkentés, támgörgők pozicionálási hibája, kopása, excentricitása, támgörgők közötti kihajlás széleskörű figyelembevételével a várható „porozitási” és „olvadékaramlási sebesség függvények” meghatározására.

A szoftverek gyakorlati alkalmazására az ISD Dunaferr Dunai Vasmű Zrt. folyamatos öntőművében ipari körülmények között került sor. Az elmúlt időszakban ezzel a szoftver rendszerrel ellenőrizték az újonnan bevezetett B08-as jelű lemezbuga öntési paramétereit. Többek között e két szoftverre támaszkodva végzik azokat az újabb fejlesztéseket, melyek célja a folyamatosan öntött lemezbugák belső minőségének javítása a folyamatos öntőmű támgörgő beállítási stratégiájának felülvizsgálatával.

IV. Az új tudományos eredményeket tartalmazó publikációk

[T1] Réger M, Szélig Á, Verő B, Magyar I, Králik Gy: Elméleti megfontolások az acélok folyamatos öntését kísérő térfogatváltozásokkal kapcsolatban, BÁNYÁSZATI KOHÁSZATI LAPOK-KOHÁSZAT 133:(1) pp. 2-6. (2000)

[T2] Fehérvári G, Verő B, Réger M: Az acélok folyamatos öntésének termikus modellezése TEMPSIMU-programmal, BÁNYÁSZATI KOHÁSZATI LAPOK-KOHÁSZAT 134:(11-12) pp. 382-386. (2001)

[T3] Réger M: Folyamatosan öntött szál belső szerkezetének jellemzése hőtani modell alapján, MŰSZAKI GAZDASÁGI KÖZLEMÉNYEK - DUNAFERR DUNAI VASMŰ RT XLI:(4) pp. 171-176. (2001)

[T4] Réger M, Verő B, Fehérvári G, Szélig Á, H Kytönen, S Louhenkilpi: Folyamatosan öntött lemezbugák oszlopos és egytengelyű kristályosodása közötti átmenet, BÁNYÁSZATI KOHÁSZATI LAPOK-KOHÁSZAT 135:(4-5) pp. 109-114. (2002)

[T5] Réger M, Verő B, Kytönen H, Louhenkilpi S: Microstructure Characterisation of Continuously Cast Stabs by Using Heat Transfer Model, In: Proc. of 4th European Continuous Casting Conference. Birmingham, Anglia, 2002.10.14-2002.10.15., Birmingham: Institute of Materials, pp. 969-978.

[T6] Fehérvári G, Réger M, Verő B: Analysis of the Effect of Casting Parameters on Continuous Steel Casting, MATERIALS SCIENCE FORUM 414-415: pp. 395-404. (2003)

[T7] Réger M, Louhenkilpi S: Characterising of the Inner Structure of Continuously Cast Sections by Using of Heat Transfer Model, MATERIALS SCIENCE FORUM 414-5: pp. 461-469. (2003)

[T8] Réger M: Practical Method for Macrostructure Characterisation of CC Slabs, In: Sarler B, Gobin D (szerk.), Proc. Of the Seminar EUROTHERM 69, Heat and Mass Transfer in Solid-Liquid Phase Change Processes. Ljubljana, Szlovénia, 2003.06.25, Ljubljana: pp. 171-179.(ISBN:961-6311-15-8)

- [T9] Réger M, Louhenkilpi S: Effect of Some Technological Parameters on the Macrosegregation of CC Slab, In: Int. Jubilee Conference Budapest Poytechnic. Budapest, Magyarország, 2004.09.04, pp. 131-138.
- [T10] Réger M, Verő B, Csepeli Zs, Szélig Á: Folyamatosan öntött bugák makrodúsulása, Bányászati Kohászati Lapok-Kohászat 137:(5) pp. 9-13. (2004)
- [T11] Reger M, Vero B, Kytönen H, Louhenkilpi S, Szelig A: Macrostructure prediction of CC slabs, MATERIALS SCIENCE FORUM 473-474: pp. 375-380. (2005)
- [T12] Réger M: Válasz Kaptay Györgynek. Bányászati Kohászati Lapok-Kohászat 138:(5) pp. 14-18. (2005)
- [T13] Fehervari G, Reger M, Szelig A, Vero B: A folyamatos öntőgép kristályosítójában lejátszódó folyamatok fémtani vonatkozásai, Bányászati Kohászati Lapok-Kohászat 139:(5) pp. 1-6. (2006)
- [T14] Réger M, Verő B, Szélig Á, Szabó Z: Folyamatosan öntött lemezbugák 3D-s jellemzése, Műszaki Gazdasági Közlemények - Dunaferr Dunai Vasmű RT XLVI:(1) pp. 21-26. (2006)
- [T15] Réger M, Verő B, Csepeli Zs, Szélig Á: Macrosegregation of CC Slabs, MATERIALS SCIENCE FORUM 508: pp. 233-238. (2006)
- [T16] Réger M, Verő B, Szelig Á: 3D Characterization of Continuously Cast Slabs, MATERIALS SCIENCE FORUM 537-538: pp. 555-562. (2007)
- [T17] Reger M, Kytönen H, Verő B, Szelig Á: Újabb gondolatok a lemezbugák középvonali dúsulásáról, Műszaki Gazdasági Közlemények - Dunaferr Dunai Vasmű RT XLVII:(4) pp. 183-190. (2007)
- [T18] Kardos I, Verő B, Csepeli Zs, Reger M: Systemetic examination of metallographic methods for detection of primary steel texture, MATERIALS SCIENCE FORUM 589: pp. 25-30. (2008)
- [T19] Reger M, Kytönen H, Verő B, Szelig A: Effect of the Casting Machine Condition on the Quality of Cast Slabs, ACTA MECHANICA SLOVAKA 12:(3A) pp. 373-380. (2008)

- [T20] Reger M, Kytönen H, Verő B, Szelig A: Estimation and Consequences of Shrinkage of Steel Slabs, MATERIALS SCIENCE FORUM 589: pp. 43-48. (2008)
- [T21] Reger M, Vero B, Felde I, Kardos I: Lemezbugák középvnali dúslulásának csökkentési lehetőségei hőkezeléssel. In: Tóth T (szerk.), XXIII. Hőkezelő és Anyagtudomány a Gépgyártásban Országos Konferencia és Szakkiállítás. Balatonfüred, Magyarország, 2008.10.01-2008.10.03, Dunaújváros: pp. 195-200. (ISBN:963-86533-2-9)
- [T22] Reger M, Kytönen H, Verő B, Szelig A: On the Centreline Segregation of CC Slabs, In: 6th European Conference on Continuous Casting 2008. Riccione, Olaszország, 2008.06.03-2008.06.06, Associazione italiana di metallurgia, pp. CD1-CD12.
- [T23] Reger M, Vero B, Felde I, Kardos I, Colas R, Yu DY: Stability Examinations of Centerline Segregation of Slabs, JOURNAL OF THE JAPAN SOCIETY OF HEAT TREATMENT - NETSU SHORI 49, ISSN 0288-0490, pp. 741-744 (2009)
- [T24] Reger M, Kytönen H, Vero B, Szelig A: Centerline Segregation of CC Slabs, MATERIALS SCIENCE FORUM 649: pp. 461-466. (2010)
- [T25] Szabó Z, Réger M, Verő B, Szabados O, Csepeli Zs, Kelemen T: A folyamatos acélöntés technológiai és technikai felülvizsgálata, az öntött szál minőségének javítása érdekében, ISD DUNAFERR MŰSZAKI GAZDASÁGI KÖZLEMÉNYEK (ISSN: 1789-6606) XLIX: (3) pp. 120-147. (2010)
- [T26] Reger M, Vero B, Kardos I, Varga P: The Effect of Alloying Elements on the Stability of Centerline Segregation, DEFECT AND DIFFUSION FORUM 297-301: pp. 148-153. (2010)
- [T27] Reger M, Vero B, Felde I, Kardos I: The Effect of Heat Treatment on the Stability of Centerline Segregation, JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING 56:(2) pp. 143-149. (2010)
- [T28] Reger M, Vero B, Kardos I, Fábíán E R, Kaptay Gy: Diffusion of Carbon in the Centerline Region of CC Slabs, MATERIALS SCIENCE FORUM (ISSN: 0255-5476) 659: pp. 441-446. (2010)

Hivatkozások

[II.1.1] M. El-Bealy: Fluctuated Cooling conditions and Solid Shell Resistance in Continuously Cast Steel Slabs, Canadian Metallurgical Quaterly, Vol. 36, No. 3, 203-222, 1997

[II.1.2] Mathematical Description of Flow and Heat Transfer in Continuous Casting Machines, Final Report, European Comission, Directorate-General for Research, EUR 21930, 2005

[II.1.3] Extension of Advanced Monitoring and Control Techniques at Continuous Casting process, Final Report, European Comission, Directorate-General for Research, EUR 22815, 2007

[II.1.4] Erdmann R. G., Poirier D.R., Hendrick A.G.: Permeability in the Mushy Zone, Materials Science Forum Vol. 649, pp. 399-408

[II.2.1] H. Jacobi: Investigation of Centreline Segregation and Centreline Porosity in CC-Slabs, Steel Research, Vol. 74, No. 11/12, 2003

[II.2.2] G. Lesoult: Macrosegregation in Steel Strands and Ingots: Characterisation, Formation and Consequences, Materials Science and Engineering A, Vol. 413-414, 2005, pp. 19-29

[II.2.3] Y. Tsuchida et al.: Behavior of Semi-macroscopic Segregation in Continuously Cast Slabs and Technique for Reducing the Segregation, Transactions ISIJ, Vol. 24, 1984, pp.899-906

[II.2.4] H. Presslinger et al.: Methods for Assessment of Slab Centre Segregation as a Tool to Control Slab Continuous Casting with Soft Reduction, ISIJ International, Vol 46, No. 12, 2006, pp. 1845-1851

[II.3.1] J.S. Ha et al.: Numerical Analysis of Secondary Cooling and bulging in the Continuous Casting of Slabs, Journal of Materials Processing Technology Vol. 113, pp. 257-261, 2001

[II.3.2] F. Kavicka et al.: The Optimization of a Concasting Technology by Two Numerical models, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 185, Iss. 1-3, 30 April 2007, pp. 152-159

- [II.3.3] J. Miettinen, H. Kytönen, S. Louhenkilpi, J. Laine, Proc. of 12th IAS Steelmaking Seminar, Buenos Aires 1999, pp. 488-497
- [II.3.4] Louhenkilpi, S., Miettinen, J., Holappa, L., Simulation of microstructure of as-cast steels in continuous casting. ISIJ Int. 46(2006) 6, pp. 914-920
- [II.3.5] Louhenkilpi, S., Mäkinen, M., Vapalahti, S., Räisänen, T., Laine, J., 3D steady state and transient simulation tools for heat transfer and solidification in continuous casting. Materials Science and Engineering A, 413-414 (2005), pp. 135-138.
- [II.4.1] G. Krauss: Steels: Heat Treatment and Processing , ASM Int. Metals Park Ohio, USA, 1990
- [II.4.2] Wyss, U.: Grundlagen der Gasaufkohlung und Schutzgasglühung nach einem neuen Eintropfverfahren, HTM 17, 1962, 3, pp. 160-171
- [II.4.3] M.Hillert, M.Waldenström: Metal. Trans. A, 1977, vol.8A, pp.5-13
- [II.4.4] W.Huang: Metal. Trans. A, 1991, vol.22A, pp. 1911-1920